

Lavtemperatur brenselceller

Lavtemperatur brenselceller

En del av eksamensoppgave i MEF4200 Energimaterialer ved UiO høsten 2004. Oppgaven var å skrive populærvitenskapelig for avgangselever i videregående skole

Av

Trine Tønnessen

Sammendrag

Som del av eksamen i emnet MEF4200 Energimaterialer ved Universitetet i Oslo (UiO) høsten 2004 var oppgaven å skrive en populærvitenskapelig artikkel for avgangselever i videregående skole. Artikkelen presenteres her og omhandler lavtemperatur brenselceller. De brenselcelletypene som beskrives er alkaliske brenselceller, PEM-brenselceller og metanolbrenselceller, alle med en driftstemperatur på normalt under 100 °C, og deres bruksområder.

Skriftserien nr. 123

25 s.

Pris: 80,- NOK

ISSN: 1503-5174 (elektronisk utg.)

ISBN: 82-7117-571-8 (elektronisk utg.)

Emneord:

© Høgskolen i Agder, 2003
Serviceboks 422, N-4604 Kristiansand

Design: Høgskolen i Agder

Alkaliske brenselceller, AFC
PEM-brenselceller, PEMFC
Metanolbrenselceller, DMFC

Innhold

Brenselceller - hva er det?	1
Driftstemperaturinndeling av brenselceller	2
Hvor brukes brenselceller?	2
Hvorfor bruke brenselceller?	3
Prinsippet for brenselceller	4
Alkalisk brenselcelle (AFC)	5
AFC-typer	7
Elektroder for AFC	10
PEM-brenselcelle (PEMFC)	11
Elektrolytt	12
Elektroder	14
MEA	15
Vanninnhold	16
CO-forgiftning	17
Metanolbrenselcelle (DMFC)	18
Forkortelser som brukes	21
Brenselceller	21
Kjemiske symbol/forbindelser	22
Andre forkortelser	22
Forklaringer, definisjoner og huskeregler	23
Referanser	24

Brenselceller - hva er det?

På en måte kan vi si at brenselceller er noe som er sendt fra himmelen. Hvorfor? Jo – de første brenselcellene ble brukt i romfartøy og skal vi nå klare å redusere utslipp av drivhusgasser for å få bedre miljø her på jorden, kan brenselceller være et virkemiddel.

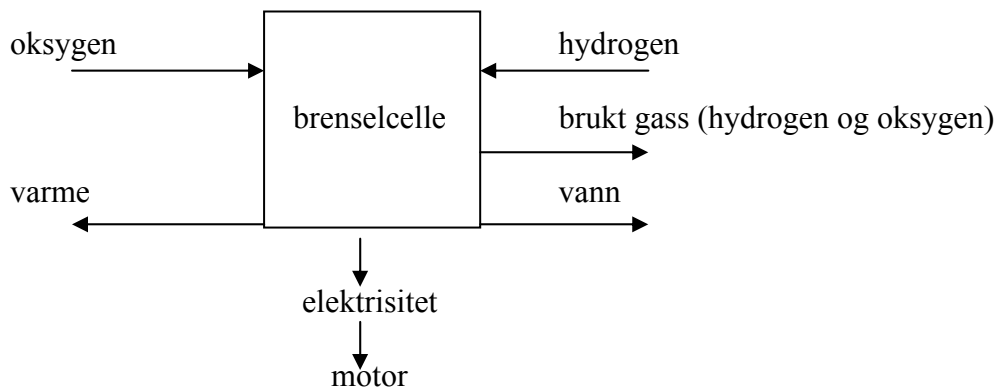
Definisjonen på brenselceller finner vi i leksikon [1], for eksempel:

"Brenselcelle, elektrisk element hvor kjemisk energi som også kan frigjøres som varme ved forbrenning, brukes til å frembringe elektrisk strøm."

Vi kan også finne definisjon på brenselceller på Internett, for eksempel fra www.fuelcell.today [2]:

"A fuel cell is an electrochemical device, which converts chemical energy to electrical energy without combustion. Unlike a battery, a fuel cell will continuously produce electricity as long as fuel is supplied to it."

Her skal vi prøve å si noe om hva brenselceller som kort sagt er noe der hydrogen og oksygen går inn og strøm, brukt gass, varme og vann kommer ut, se enkel skisse i figur 1. Videre skal vi si noe om hva brenselceller brukes til og hvorfor. Sist i artikkelen et finnes liste over forkortinger som brukes, forklaringer og definisjoner. Hvis det dukker opp ord du ikke skjønner helt, kan det hende at ordene er forklart der.



Figur 1 Brenselcelleprinsippet

Brenselcellene har navn etter hvilken *elektrolytt* som brukes, bortsett fra en, metanol-brenselcellen, som har forkortelse DMFC. Vi kan velge å dele inn brenselcellene på to ulike måter [3]:

- etter hvilken *driftstemperatur* de har
- etter hvilket *bruksområde* de har

Driftstemperaturinndeling av brenselceller

Når det gjelder driftstemperatur er det vanlig å dele brenselcellene inn i *lavtemperatur* og *høytemperatur*. Det går også å bruke: *lavtemperatur* og *middels- og høytemperatur* [4].

Vi mennesker kan synes at alt under romtemperatur (ca. 20-25 °C) er lav temperatur, da må vi kle på oss ekstra godt. Men brenselceller har det ikke på samme måten. Her er det alt under 150 °C som anses som lav temperatur. Sure brenselceller, typene med fosforsyre-elektrolytt, PAFC, plasseres noe ulikt, de kan klassifiseres som lavtemperatur, men også som høytemperatur, da inkludert i middels- og høytemperatur brenselcellene.

Hvor brukes brenselceller?

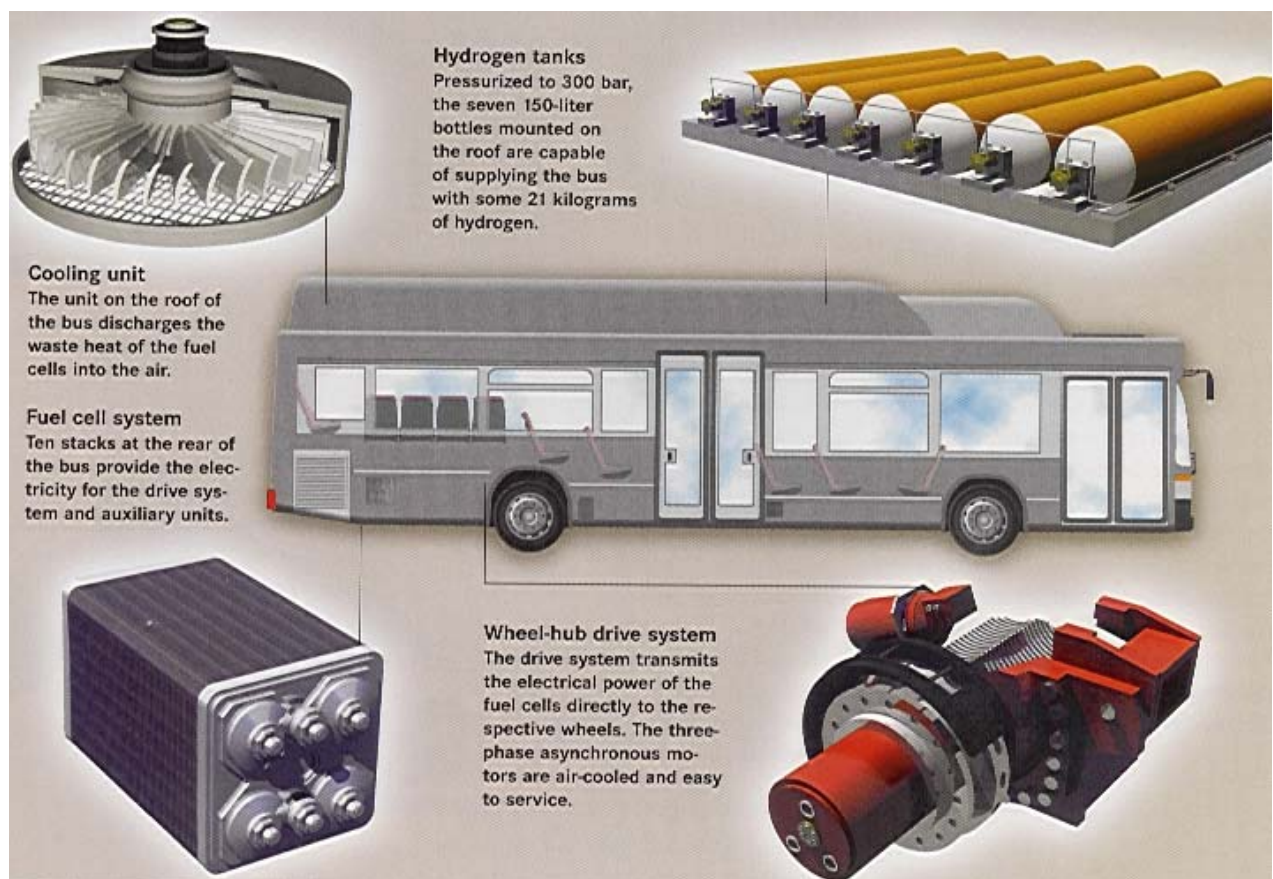
Ikke bare til busser og biler, som mange kanskje tenker. Har du opplevd at strømmen er brukt opp på mobilen akkurat når du venter en viktig melding fra kompisen? Det kunne sannsynligvis vært unngått hvis mobilen hadde en brenselcelle i stedet for batteri. En brenselcelle med metanol som drivstoff vil kunne gi mobilen 5-8 ganger lengre driftstid enn tradisjonelle batterier [5].

Hvis vi deler brenselceller inn etter bruksområde, får vi en grei oversikt over hvor brenselceller brukes, eller hvor de kan tenkes bli brukt. Vi kan dele inn i:

- 1) stasjonære brenselceller
- 2) mobile brenselceller
- 3) bærbare brenselceller

De stasjonære brenselcellene inkluderer kraftanlegg, store og små, som gir elektrisitet – og varme – til for eksempel hus, sykehus og industri. Mobile brenselceller kan vi kalle de som kan benyttes i biler, busser (som vist i figur 2) og fly. De bærbare typene er de som brukes for eksempel til datamaskiner og mobiltelefoner, der vi normalt ellers finner batterier.

På disse sidene konsentrerer vi oss om typene AFC, PEMFC og DMFC. Dette er brenselceller med lav driftstemperatur (50-250 °C), normalt er driftstemperaturen under 100 °C. Hvis du ønsker å vite mer om middels- og høytemperaturbrenselcellene PAFC, MCFC og SOFC, kan du finne informasjon på Internett [3].



Figur 2 Brenselcellebuss NEBUS som er presentert i brosjyre fra DaimlerBenz [6]

Hvorfor bruke brenselceller?

Du har kanskje fått med deg de siste årenes økning i strømprisene? Norge har hatt rikelig tilgang på elektrisitet produsert av vannkraft. Fordi det ikke lenger er billig vannkraft tilgjengelig [7] er det greit å se på andre måter å skaffe elektrisitet på. Mange hytter [8] og fyrlykter [9] har allerede solcelleanlegg, og solceller kan være et alternativ. Har du vært i Danmark, la du sikkert ganske snart merke til alle vindmøllene som fantes i landet. Dette er også et alternativ for Norge. Solceller og vindmøller er gode systemer som bruker fornybare energikilder.

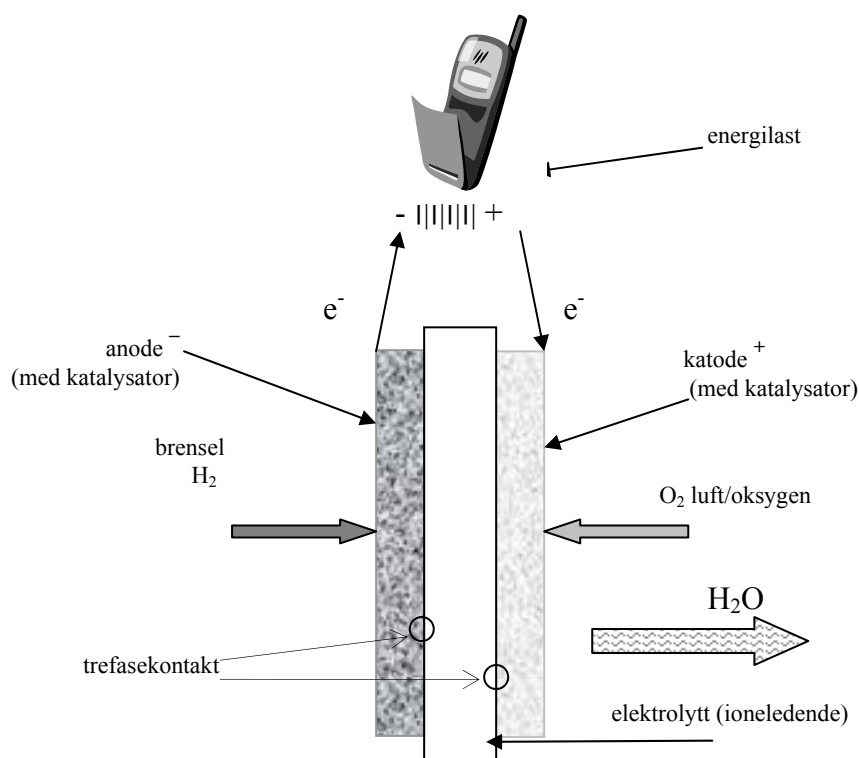
Brenselceller kan også brukes. Brenselceller med hydrogen som brensel forurenses ikke under drift, eneste utslipp blir vann og varme. Biler med hydrogen som drivstoff er et alternativ som kan kombinere nullutslipp med den bekvemmelighet vi er blitt vant til og med den kjørelengden vi vil ha.

Hydrogen finnes i store mengder i naturen, men ikke som fritt stoff. Hydrogen må der-

for fremstilles, for eksempel fra vann. Vi skal ikke gå videre inn på hydrogenfremstilling eller lagring og transport av hydrogen her, vil du sjekke mer finnes det mye info på Internett, se for eksempel referansene [3, 7, 10].

Prinsippet for brenselceller

I figur 1 er det en enkel skisse av hva vi må putte inn i og hva vi får ut av en brenselcelle. Figur 3 er en skisse av hvordan en brenselcelle er bygd opp, hvilke reaksjoner som skjer og hva som går inn og ut.



	alkalisk brenselcelle	PEM-brenselcelle
anode	$2\text{H}_2 + 4\text{OH}^- \rightarrow 4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$
elektrolytt	OH^-	H^+
katode	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
totalreaksjon	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
cellespenning	$E^0 = +1.23 \text{ V}$	$E^0 = +1.23 \text{ V}$
trefasekontakt	grenseflaten mellom reagerende gass, elektrolytt (flytende/stoff) og elektrode (fast stoff), eventuelt med katalysator.	

Figur 3 Prinsippet for brenselceller med de tilhørende kjemiske ligninger m.m.

En brenselcelle kan ideelt skape en spenning på 1.23 V, men under drift er cellespenningen vanligvis 0.7 V. For å få ønsket spenning kobles flere celler (elementer) sammen i serie. Flere brenselceller koblet sammen i serie kalles en *stakk*.

I alle lavtemperaturbrenselcellene benyttes det katalysator som er et stoff som øker reaksjonshastigheten uten selv å bli brukt opp/delta i reaksjonen.

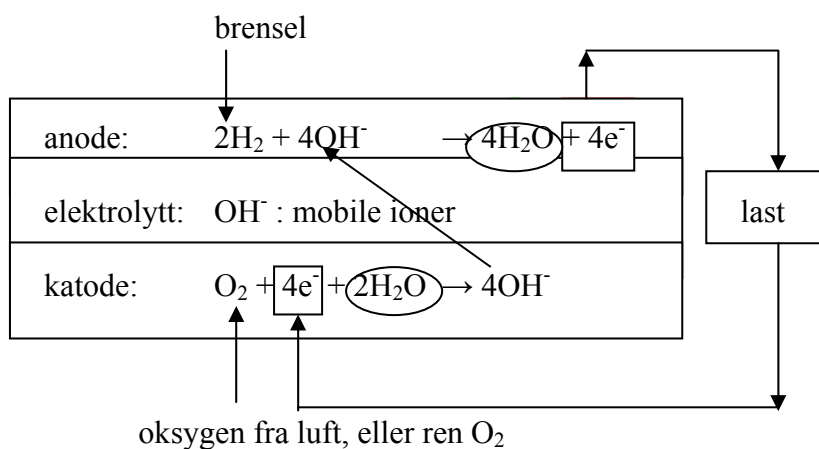
Alkalisk brenselcelle (AFC)

Tabell 1, data for AFC uthevet

	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Anode	Ni	porøs C	porøs C	porøs C og edelmetaller	porøs Ni-Cr/Ni-Al	Ni-YSZ-cermet
Elektrolytt	KOH	ionebyttemembran	ionebyttemembran	fosforsyre (H_3PO_4)	karbonatsmelte	YSZ
Ladningsbærer (mobilt ion)	OH^-	H^+	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
Katode	Ni/C	porøs C	porøs C	porøs C og edelmetaller	Li-dopet NiO	Sr-dopet LaMnO_3
Katalysator	Pt/Ni	Pt/Ru	Pt+Ru(anode) Pt(katode)	Pt og Ru		Ni
Brensel	H_2	ren H_2	metanol (CH_3OH)	H_2	H_2 eller CO	rent H_2 eller fossilt brensel som CH_4/CO
Oksidant	rent O_2	O_2	O_2	O_2	$\text{O}_2 + \text{CO}_2$	O_2
Driftstemperatur	50-250 °C	50-120 °C	50-120 °C	150-200 °C	600-800 °C	600-1100 °C
Virkningsgrad	70 %	40-50 %	40-50 %	40 %	60 %	45-70 %
Typisk effekt	1-100 kW	1 W-250 kW	<3 kW	10 kW-11 MW	500 kW-10 MW	1 kW-10 MW
Bruksområde	Romfartøy, u-båt, bil, små elektromotorer	buss, bil, pc, mobiltelefoner, småelektriske apparater, små CHP	buss, bil, pc, mobiltelefoner, småelektriske apparater, små CHP	små energiverk, midtels CHP	energiverk, store CHP	energiverk, CHP
Ionene i elektrolytten går	fra katoden til anoden	fra anoden til katoden	fra anoden til katoden	fra anoden til katoden	fra katoden til anoden	fra katoden til anoden
Vann som produkt ved	anoden	katoden	katoden	katoden	anoden (ikke vann med CO som brensel)	anoden (ikke vann med CO som brensel)

Kilder : [4, 11-13] (med forbehold om feil/ufullstendighet).

I tabell 1 er data som gjelder alkaliske brenselceller uthevet. Vi kan skjematisk tegne den alkaliske brenselcellen som en anode, elektrolytt og katode med en last, som vist i figur 4. Lasten er det vi kan kalle en *energibruker* som lyspære, pc eller mobiltelefon. Elektronene, e^- , går fra anoden via lasten til katoden.



Figur 4

Skjematisk tegning av alkalisk brenselcelle

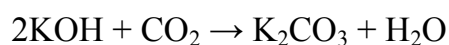
Vanligvis er de tre delene anode, elektrolytt og katode i brenselceller montert vertikalt som vist i figur 3 (i figurene 4, 9 og 16 er brenselcellene tegnet horisontalt av praktiske årsaker).

For en alkalisk brenselcelle inneholder elektrolytten OH^- -ioner (hydroksidionene). I elektrolytten beveger hydroksidionene seg. Ionene produseres på katodesiden og brukes opp på anodesiden.

For å få hydroksidioner i elektrolytten trenger vi en alkalisk (basisk) løsning, for eksempel kaliumhydroksid (KOH) eller natriumhydroksid (NaOH). Kaliumhydroksid og natriumhydroksid er lett løselige og rimelige alternativer, noe som gjør at de er greie å bruke. Det avsettes lett karbonater på elektrodene og i elektrolytten. Fordi kaliumkarbonat (K_2CO_3) er mer løselig enn natriumkarbonat (Na_2CO_3), og det blir mindre slike avsetninger, velges kaliumhydroksid (KOH) i alkaliske brenselceller. KOH-elektrolytten er faktisk den eneste felles faktor for de ulike alkaliske brenselcellene. Driftstemperatur, elektrode og katalysator varierer [4].

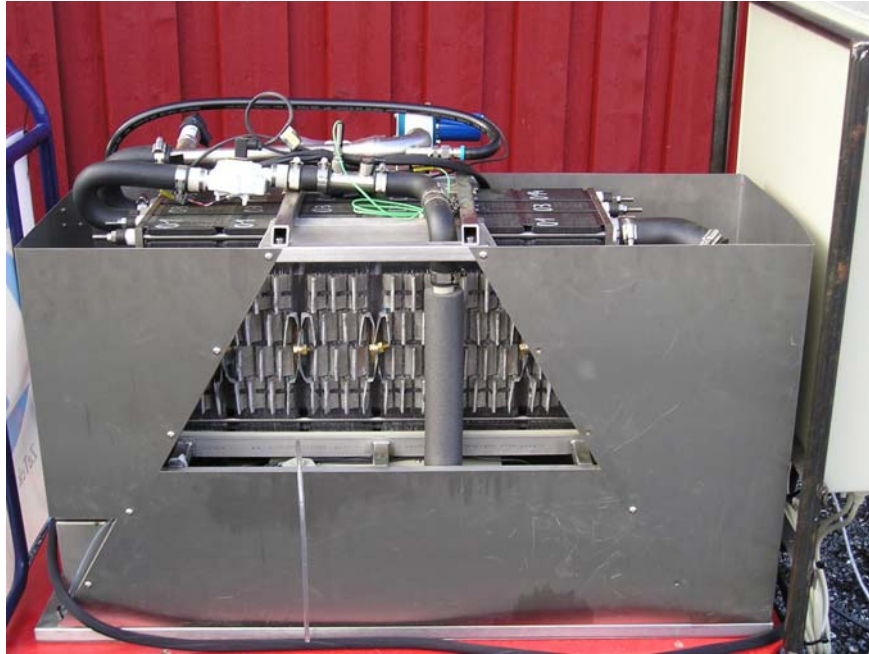
Driftstemperaturen for AFC er som oftest under 100°C , men det oppgis verdier opp til 250°C [14]. Jo høyere driftstemperatur, desto mer konsentrert elektrolytt (85 vekt %) behøves. For lavere driftstemperaturer er det behov for mindre konsentrert elektrolytt (35-50 vekt %) [3].

Den største ulempen med AFC er at CO_2 reagerer med elektrolytten og danner massivt karbonat (salt) på innsiden av brenselcellen etter reaksjonsligningen



Ulempene med alkaliske brenselceller knytter seg i stor grad til CO_2 i luften som gir avsetninger av karbonat. Det er ikke mulig å fjerne all karbondioksid, men problemet blir redusert ved å ta med en CO_2 -skrubber og filter i lufttilførselssystemet [4]. I en *reverserbar brenselcelle* (URFC) kan vi benytte hvilken som helst brenselcelletype, men blant annet på grunn av de alkaliske brenselcellenes ulemper er AFC glimrende å bruke i en reverserbar brenselcelle. En reverserbar brenselcelle er en celle som kan fungere i begge retninger (brenselcelle og elektrolyse). I elektrolyse spaltes vann (H_2O) til H_2 og O_2 ved hjelp av strøm. Rent hydrogen og rent oksygen som produseres ved elektrolyse, brukes videre i den alkaliske brenselcellen.

Figur 5 viser en alkalisk brenselcelle som er plassert i Energiparken til Høgskolen i Agder på Dømmesmoen i Grimstad.



Figur 5 Alkalisk brenselcelle fra Ztek, 2.5 kW, plassert i Energiparken

AFC-typer

Vi skal her se på tre forskjellige AFC-typer: 1) mobil elektrolytt, 2) stasjonær elektrolytt og 3) oppløst drivstoff. De fleste alkaliske brenselcellene har mobil elektrolytt.

I *mobil elektrolytt* AFC pumpes kaliumhydroksidelektrolytten rundt i brenselcellen som vist i figur 6, slik at den sirkuleres.

Hovedfordelene ved den bevegelige elektrolytten er:

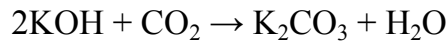
- Vi kan bruke den sirkulerende elektrolytten i et kjølesystem.
- Elektrolytten blandes kontinuerlig.

Et problem er at vann forbrukes ved katoden og produseres dobbelt så raskt ved anoden (se $4H_2O$ og $2H_2O$ i figur 4). Dette kan resultere i at elektrolytten blir konsentrert ved katoden, så konsentrert at den blir massiv. Og det vil vi ikke at skal skje! Problemet reduseres når elektrolytten blandes.

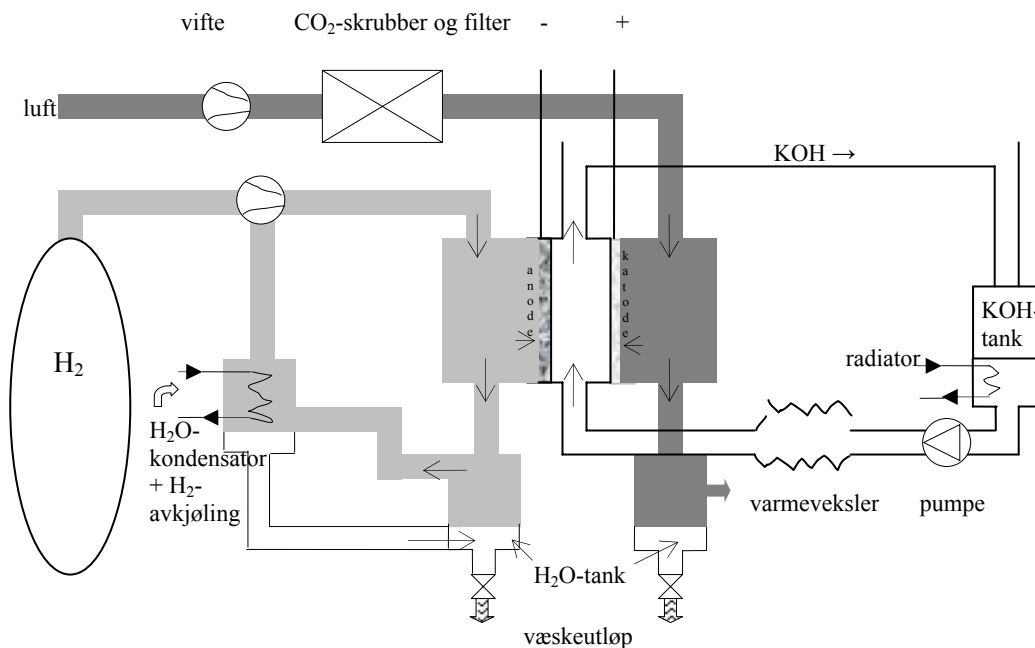
- Hvis produktvannet overføres til elektrolytten i stedet for å fordampe ved anoden vil elektrolytten tynnes ut. Den mobile elektrolytten kan passere gjennom et system

som gjør at elektrolyttkonsentrasjonen opprettes.

- Det er enkelt å pumpe ut elektrolytten og erstatte den med en ny løsning.
Dette kan sammenlignes med hva vi gjør når vi foretar oljeskift på bilen og er aktuelt hvis elektrolytten blir forurenset og fortynnet på grunn av reaksjon med karbondioksid. Kaliumhydroksid reagerer med karbondioksid i luften og endres gradvis til kaliumkarbonat:



Dette problemet blir mindre ved å inkludere CO₂-skrubber i lufttilførselssystemet, men all CO₂ fjernes ikke. Andre alternativer er å bruke natronkalk eller et integrert rengjøringsystem i den sirkulerende elektrolytten [15].



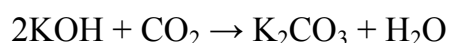
Figur 6 Skisse av alkalisk brenselcelle med mobil elektrolytt

Ulempen med den bevegelige elektrolytten er utstyret som trengs for den mobile "enheten" – med det menes elektrolytten – som gjør alt mer komplisert fordi vi trenger pumpe, rør og ekstra arbeid med å designe brenselcellen slik at vi kan snu den i alle retninger under bruk. Mer rør betyr større mulighet for lekkasje fra kaliumhydroksid. Vi kan også få ionisk ledningsevne mellom cellene innenfor en stakk. Dette kan negativt påvirke stakkytelsen og vi får "indre kortslutning". Elektroner mistes slik at de ikke går i den ytre kretsen som gir oss strøm. Dette problemet kan reduseres ved å

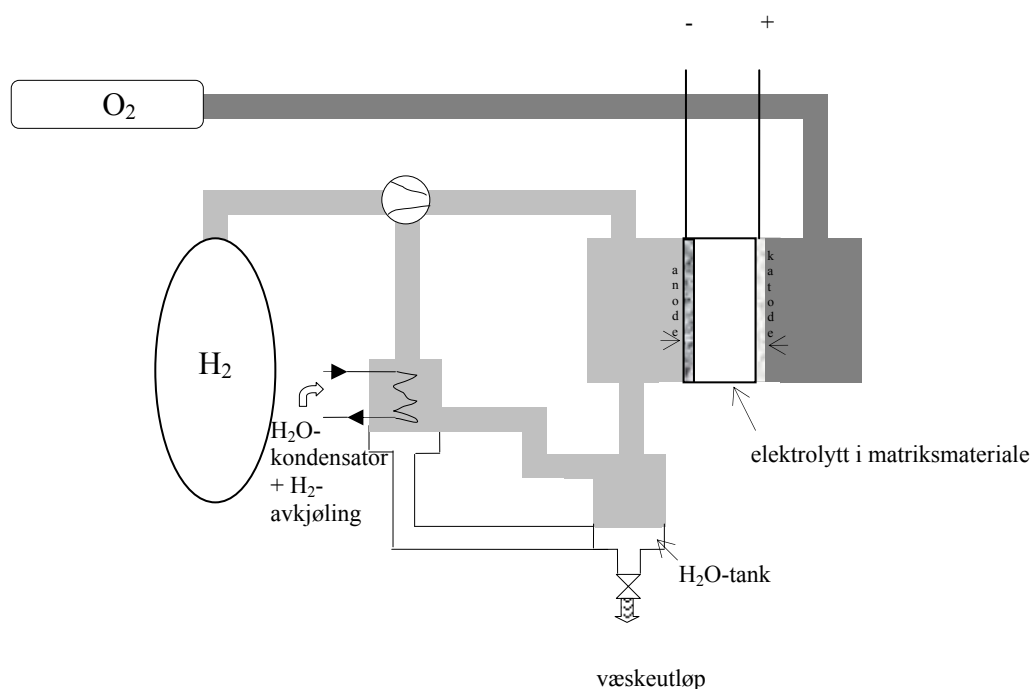
koble cellene både i serie og i parallell.

Stasjonær elektrolytt-AFC har fordelen at hver celle har sin egen separate elektrolytt i et matriksmateriale, se figur 7. Brenselcellen kan derfor være hvilken som helst vei fordi matriksmaterialet holder elektrolytten slik at elektrolytt ikke renner ut. Matriks er element som holder struktur på plass.

Blant ulempene er at det er ingen toleranse for CO₂. Det betyr at rent oksygen må tilføres katoden. I motsetning til brenselcellen med den mobile elektrolytten, kan ikke den stasjonære elektrolytten byttes ut så lett. For også her gjelder reaksjonsligningen



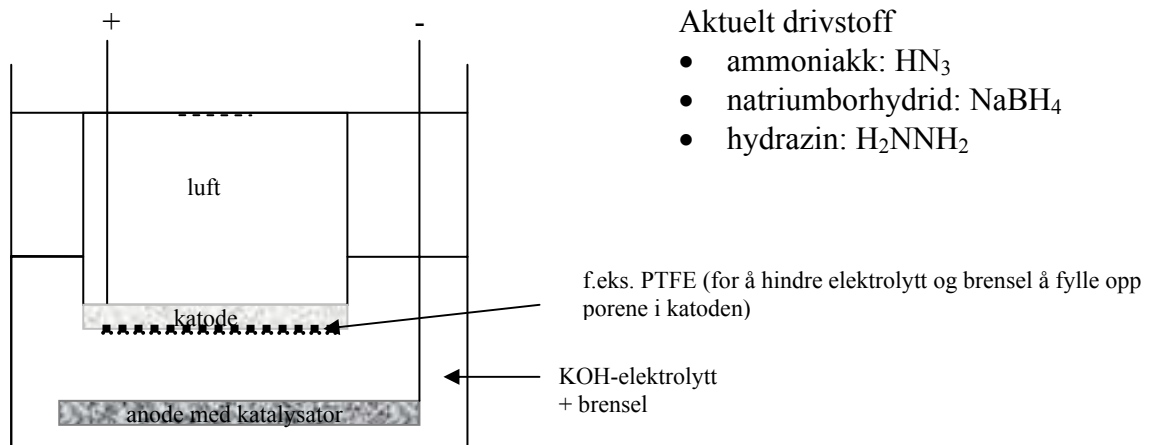
Matriksmaterialet er som regel av asbest som er et problem. Det er behov for kjøling, noe som betyr at her må kjølevann eller annen væske brukes. For at alkalisk brenselcelle med stasjonær elektrolytt skal få utbredt anvendelse, må det utvikles et annet matriksmateriale enn asbest.



Figur 7 Skisse av alkalisk brenselcelle (en celle) med stasjonær elektrolytt

Den siste typen som nevnes her er *oppløst drivstoff*-AFC. Det er den enkleste brenselcellen å lage, se figur 8. Drivstoffet blandes med elektrolytten. Det er bare anoden som har katalysator (Pt). Det er ikke sannsynlig at denne typen brenselcelle kommer til å

bli brukt i energiverk etc. [4].



Figur 8 Tversnitt av et eksempel på en alkalisk brenselcelle med drivstoff oppløst i elektrolytten

Elektroder for AFC

Det finnes flere elektroder for alkaliske brenselceller. Elektrodene er avhengig av

- ytelseskrav
- kostnadsramme
- driftstemperatur
- trykk

Ulike katalysatorer kan også bli brukt uten at dette har noe å si for elektrodestrukturen. Vi nevner her tre typer elektroder [4]: 1) sintret nikkelpulver, 2) Raney-materialer og 3) valsete elektroder. De fleste alkaliske brenselceller bruker valsete elektroder.

Porøse nikkelelektroder lages fra *sintret nikkelpulver*, sintret for å få en fast struktur. For å oppnå god trefasekontakt (se figur 3) mellom reagerende gass, flytende elektrolytt og massiv elektrode, lages nikkkelelektroden i to lag med nikkelpulver i to forskjellige størrelser. Elektrodene kan brukes med eller uten katalysator.

Raney-materialer lages ved å blande et aktivt metall (vertsmetallet), for eksempel nikkel, med et ikke-aktivt metall, normalt aluminium. Dette er ingen virkelig legering fordi materialet er slik at bestemte områder av aluminium og verstmatallet opprettholdes. Materialet behandles så i en sterk alkalisk løsning som løser opp aluminiumen. Det som blir igjen er et veldig porøst materiale med stort overflateareal.

De valsete elektrodene er karbon påsatt katalysator som er blandet med PTFE (polytetrafluoretylen), valset på nikkelnett. Bindemekanismen er PTFE. PTFE er vannavstøtende slik at inntrengning av elektrolytt i elektroden blir kontrollert. I tillegg legges et tynt lag av PTFE over elektrodeoverflaten for å få enda bedre kontroll med porøsiteten. Karbonfiber kan tilsettes for å øke ledningsevnen og styrken og for å få en mer ujevn overflate som gir større overflateareal. Cellene må kobles på kanten fordi bipolare plater ikke kan brukes, fordi PTFE er et ikke-ledende materiale (se bipolare plater i figur 14).

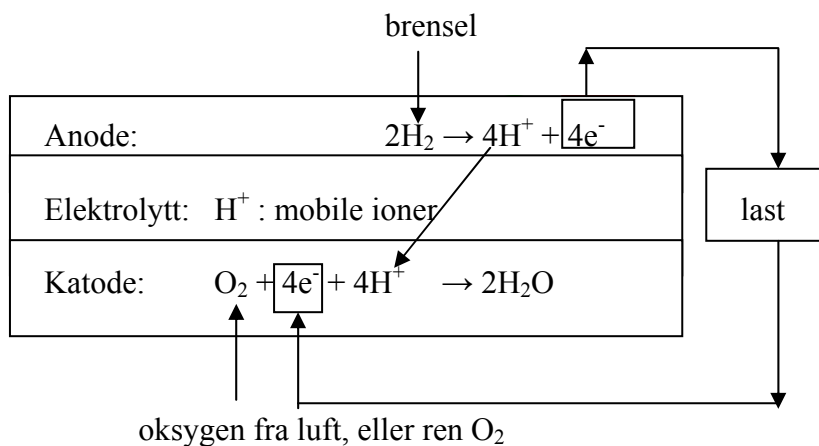
PEM-brenselcelle (PEMFC)

Tabell 2, data for PEMFC uthevet

	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Anode	Ni	porøs C	porøs C	porøs C og edelmetaller	porøs Ni-Cr/Ni-Al	Ni-YSZ-cermet
Elektrolytt	KOH	ionebyttemembran	ionebyttemembran	fosforsyre (H_3PO_4)	karbonatsmelte	YSZ
Ladningsbærer (mobilt ion)	OH^-	H^+	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
Katode	Ni/C	porøs C	porøs C	porøs C og edelmetaller	Li-dopet NiO	Sr-dopet $LaMnO_3$
Katalysator	Pt/Ni	Pt/Ru	Pt+Ru(anode) Pt(katode)	Pt og Ru		Ni
Brensel	H_2	ren H_2	metanol (CH_3OH)	H_2	H_2 eller CO	ren H_2 eller fossilt brensel som CH_4/CO
Oksidant	rent O_2	O_2	O_2	O_2	$O_2 + CO_2$	O_2
Driftstemperatur	50-250 °C	50-120 °C	50-120 °C	150-200 °C	600-800 °C	600-1100 °C
Virkningsgrad	70 %	40-50 %	40-50 %	40 %	60 %	45-70 %
Typisk effekt	1-100 kW	1 W-250 kW	<3 kW	10 kW-11 MW	500 kW-10 MW	1 kW-10 MW
Bruksområde	romfartøy, ubåt, bil, små elektromotorer	buss, bil, pc, mobiltelefoner, småelektriske apparater, små CHP	buss, bil, pc, mobiltelefoner, småelektriske apparater, små CHP	små energiverk, middels CHP	energiverk, store CHP	energiverk, CHP
Ionene i elektrolytten går	fra katoden til anoden	fra anoden til katoden	fra anoden til katoden	fra anoden til katoden	fra katoden til anoden	fra katoden til anoden
Vann som produkt ved	anoden	katoden	katoden	katoden	anoden (ikke vann med CO som brensel)	anoden (ikke vann med CO som brensel)

Kilder : [4, 11-13] (med forbehold om feil/ufullstendighet).

I tabell 2 er data som gjelder PEM-brenselceller uthevet. Som for den alkaliske brenselcellen kan vi skjematisk tegne PEMFC som en anode, elektrolytt og katode med en last som vist i figur 9. Elektronene, e^- , går fra anoden via lasten til katoden. Hydrogen tilføres anodesiden. Der hjelper katalysatoren hydrogenatomene slik at de avgir elektroner og selv blir H^+ -ioner. Disse beveger seg i elektrolytten fra anoden til katoden. H^+ -ioner brukes opp på katodesiden ved at de slår seg sammen med oksygenet (som tilføres katodesiden) og danner vann.



Figur 9 Skjematisk tegning av PEMFC

PEMFC er forkortelse for det engelske *proton exchange membrane fuel cell* eller *polymer electrolyte membrane fuel cell*. På norsk blir det protonbyttmembran-, polymerelektrolyttmembran- eller bare polymerbrenselcelle. I stedet for protonbyttmembran kan vi bruke ionebyttmembran, fordi et proton er et H^+ -ion.

Som vi kan se fra tabell 2 er det mange bruksområder der PEM-brenselceller kan fungere. Vi har systemer på:

- noen få W for å gi strøm til mobiltelefoner og annet elektronisk utstyr som laptop-pc-er etc.
- noen få kW for båter
- titalls kW for biler
- hundretall kW for busser og system for industri (CHP)

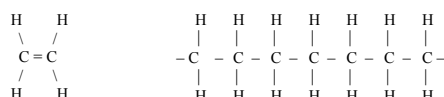
Hovedfordelene med PEMFC er den lave driftstemperaturen, hurtig oppstart, høy effektivitet og relativt enkle systemer [4]. To ting som er omtrent det samme i alle PEM-brenselceller er 1) elektrolytt og 2) elektrodestruktur og katalysator.

Elektrolytt

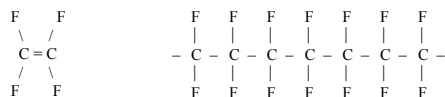
Elektrolytten er en løsning som inneholder ioner. Det er veldig vanlig å bruke Nafion® fra firmaet Dupont som elektrolytt i PEMFC. Nafion er en plastfilm som er gjennom-siktig og fleksibel. Filmen er litt tykkere, men ligner i utseende på plastfolien mange bruker på kjøkkenet og som ferdigsmurte baguetter er pakket inn i.

Vi skal se nærmere på hvordan plastfilmen som brukes i en PEMFC er bygd opp. I

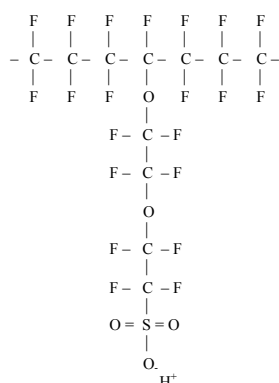
figur 10 ser vi molekylstrukturen til polyetylen som er basert på etylen. Hvis vi erstat-
ter hydrogen med fluoratomer får vi molekylstrukturen til polytetrafluoretylen (PTFE)
som er vist i figur 11. I ordet *polytetrafluoretylen* tilsvarer *tetrafluoretylen* delen *mer* i
ordet *polymer*. PTFE selges som Teflon®. Dette er meget vannavstøtende og brukes
blant annet i stekepanner, gryter, fritidsklær og skotøy.



Figur 10 Molekylstruktur til etylen og polyetylen



Figur 11 Molekylstruktur til PTFE



Figur 12 Molekylstruktur til PTFE med svovelsyringgruppe. En mulig kjede er vist, detaljene kan variere.

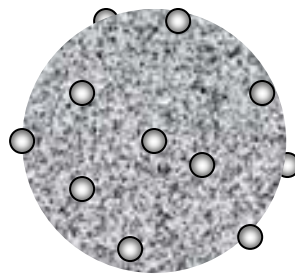
Fordi det er sterke bindinger mellom F- og C-atomene er dette et holdbart materiale
motstandsdyktig mot kjemiske angrep. PTFE er vannavstøtende som gjør at polymeren
hjelper å drive ut produktvann og hindre at luftkanalene i elektrodene fylles med vann.
I Nafion-filmen legges det til PTFE i tillegg til svovelsyringgrupper, HSO₃, se figur
12.

Svovelsyringgruppene er festet med ionebinding og sidegrenen ender i et SO₃⁻-ion.
Strukturen kalles et ionomer. Det er sterk gjensidig tiltrekning mellom det negative
SO₃⁻ og det positive H⁺-ionet i hvert molekyl. Sidegrenene "klumper" seg gjerne sam-
men på forskjellige steder i strukturen. En viktig egenskap til svovelsyring er at den

tiltrekker seg vann, så mye at tørt materiale kan øke vekten med 50 % når vann tas opp. Nafion-filmen og andre lignende materialer har i tillegg god kjemisk motstand, er mekanisk sterke, selv om de kan være veldig tynne, og de er sure. Hvis de opptar mye vann kan protonene bevege seg ganske fritt i materialet, noe som gjør filmene til gode protonledere [4].

Elektroder

Katalysatoren er platina (Pt) og veldig små Pt-partikler festes til elektrodeoverflaten, se figur 13. Elektrodeoverflaten er finfordelt karbonpulver som er noe større enn Pt-partiklene. Platina er fordelt slik at det meste av partiklene kommer i kontakt med reaktantene. De meget små platinapartiklene gjør at kostnadene til Pt ikke lenger utgjør en så stor andel av kostnadene til PEMFC som det gjorde tidligere [4].



Figur 13 Katalysatorpartikler festet på karbonpulver

To måter å lage elektrodene på er:

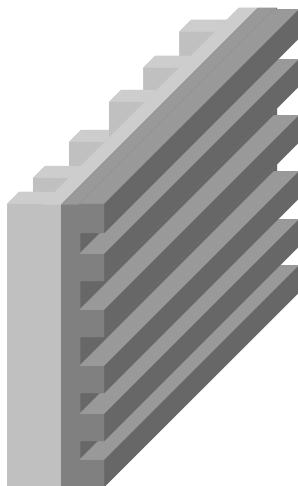
- Den karbonfestet katalysatoren er montert til et porøst og ledende materiale som en karbonfiltlignende sak eller karbonpapir. PTFE inkluderes som regel på grunn av dens vannavstøtende egenskap slik at produktvann ledes bort til overflaten der det kan fordampe. Karbonfilten eller -papiret gir mekanisk styrke til elektroden og gjør at gass diffunderer til Pt-katalysatoren. Det siste gjør at karbonfilten/-papiret kan kalles gassdiffusjonslaget. På hver side av elektrolyttmembranen er det festet en elektrode (anoden og katoden).
- Pt-katalysatoren på karbon er festet direkte til elektrolytten slik at elektroden produseres direkte på membranen istedenfor å gjøre dette separat. Katalysatoren blandes ofte med PTFE og påføres elektrolytten ved hjelp av pensel eller lignende. Gassdiffusjonslaget monteres straks katalysatoren er festet til membranen. Gassdiffusjonslaget er også her karbonfilt eller karbonpapir. Gassdiffusjonslaget gjør mer enn å diffundere gass, det danner også elektrisk ledning mellom den karbonfestete

katalysatoren og den bipolare platen eventuelt andre opplegg for strømsamling, frakter produktvannet bort fra elektrolyttoverflaten og danner et beskyttende lag over et veldig tynt katalysatorsjikt. Gassdiffusjonslaget kan være integrert del av MEA (se neste avsnitt) eller ikke.

Hvis det er viktig at brenselcellen skal være så tynn som mulig velges karbonpapir. Karbonfilten er tykkere og vil også oppta litt mer vann.

MEA

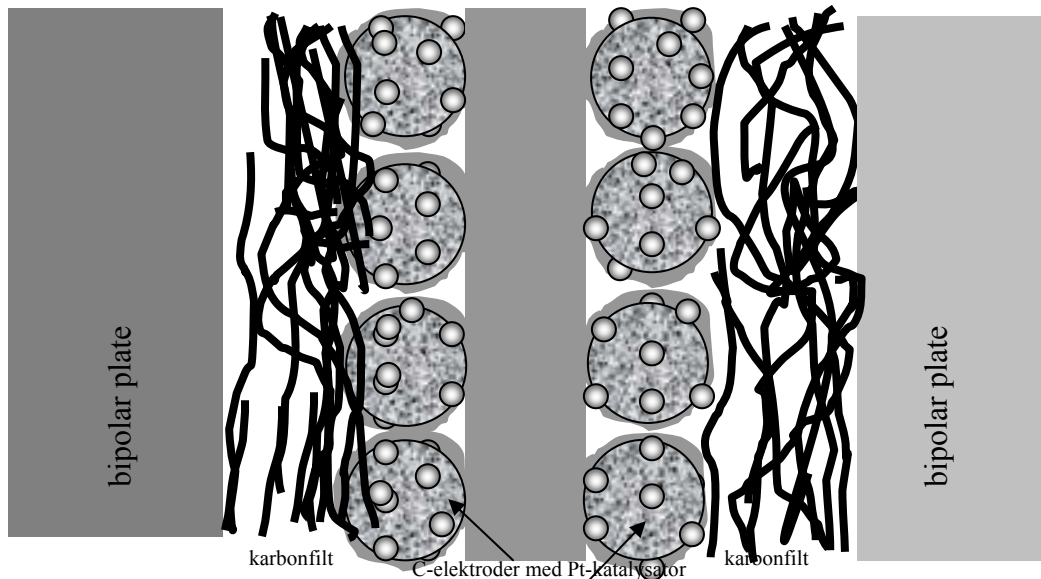
På hver side av elektrolytten, den ioneledende polymeren, er det en porøs karbonelektrode med Pt-katalysator. Anode-elektrolytt-katode-"konstruksjonen" er veldig tynn, ca. 0.3-0.7 mm. På engelsk kalles det *membrane electrode assembly*, forkortet til MEA. Flere MEA-er kobles sammen i serie ved hjelp av bipolare plater. De bipolare platene finnes i mange design, et enkelt eksempel er vist i figur 14. De bipolare platene utgjør en stor del av kostnadene, størrelsen og vekten til PEMFC. Strøm fra anoden i en celle samles av den bipolare platen som leder strømmen videre til katoden i neste celle. Den bipolare platen kobles til hele elektrodeflaten. De bipolare platene har vertikale fordypninger på den ene siden og horisontale fordypninger på den andre siden slik at oksygen tilføres katoden og brensel tilføres anoden.



Figur 14 Bipolar plate, enkelt fremstilt

De karbonfestete katalysatorpartiklene har elektrolytten på ene siden og gassdiffusjonslaget på den andre siden, se figur 15.

Fra figur 15 ser vi at det er en direkte forbindelse mellom katalysatoren og elektrolytten, i det elektrolytten omslutter katalysatoren. Dette bedrer ytelsen da vi får en god trefasekontakt mellom reagerende gass, elektrolytt og elektroden med katalysatoren. Dette "belegget" fås for eksempel ved å bruke en liten malepensel og børste oppløst elektrolyttmateriale på elektroden [4].



Figur 15 MEA-struktur i en PEMFC (tegnet veldig forstørret, total bredde er ca. 0.5-1.2 mm mellom de bipolare platene)

Vanninnhold

Protontransport er avhengig av vanninnhold. Jo mer vann, desto bedre protonlednings- evne. Men, for mye vann gjør at porene i elektrodene og gassdiffusjonslaget fylles og blokkeres. Det er derfor viktig at fuktigheten kontrolleres. Vannbalansen i elektrolyt- ten må være korrekt over det hele. Ofte er noen deler helt perfekte, andre for tørre og andre overfylte.

Luften må være så tørr at produktvannet fordamper, men ikke så tørr at den tørker for mye. Det er viktig at elektrolyttmembranen har en viss mengde vann. Fuktigheten bør være over ca. 80 % for å motvirke for mye uttørring, men må være under 100 %, ellers vil vannet samle seg i elektrodene.

Under drift beveger H^+ -ionene seg fra anoden til katoden (se figur 9) og H^+ -ionene "drar med seg" vannmolekyler, kalt electro-osmotic drag. Flere vannmolekyler dras med for hvert proton. Dette betyr at anodesiden av elektrolytten kan tørke ut, selv om

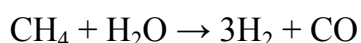
katoden er godt fuktet.

Varm luft har den effekten at den er uttørrende. Ved temperaturer over ca. 60 °C vil luften tørke ut elektrodene raskere enn vann produseres ved katoden. En vanlig måte å løse dette på er å enten fukte luften eller hydrogenet, eller begge, før de går inn i brenselcellen. Dette har stor positiv innvirkning på brenselcelleytelsen, men gjør hele systemet mer komplisert. Dette gjør det vanskelig å velge optimal driftstemperatur for PEMFC. Jo høyere temperaturen er, desto bedre er ytelsen. Ulempen er at ved en driftstemperatur på over ca. 60 °C blir det større utfordringer i å holde kontroll på fuktigheten. Det vi trenger av ekstra utstyr for å holde kontroll på fuktigheten (inkludert større kostnader, vekt og kompleksitet), trenger ikke å lønne seg hvis vi kan bruke en mindre og lettere brenselcelle. Små brenselceller kan operere uten tilleggsutstyr for ekstern fukting. Dette gjelder sjelden for større celler.

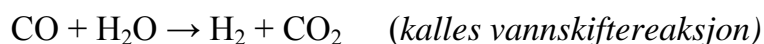
En av egenskapene til PEMFC-design som ikke er "standardiserte" er metoden brukt til å fukte reaktantgassene i en brenselcelle. Designere og utviklere eksperimenterer derfor med ulike metoder [4].

CO-forgiftning

I PEM-brenselceller kan ren hydrogen brukes. I større system kan brenselet være reformert hydrokarbon, for eksempel metan (CH₄). Vi får følgende reaksjonsligning, der karbonmonoksid produseres:



Karbonmonoksid forgifter platina, selv små mengder CO har stor innvirkning. Brenselceller som bruker Pt-katalysator kan derfor ikke bruke metan som brensel direkte (men bruker hydrogen som brensel). Vanndamp kan brukes for å endre CO til CO₂:



Pt-katalysatoren reagerer slik at CO blokkerer overflaten og hindrer at hydrogen når katalysatoren [4].

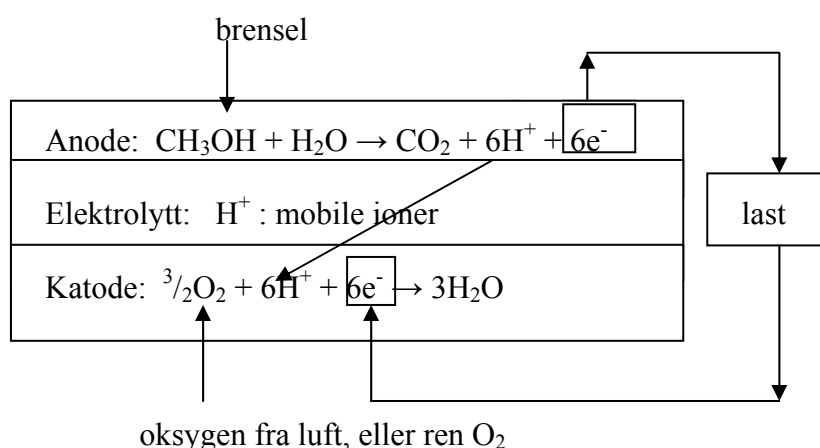
Metanolbrenselcelle (DMFC)

Tabell 3, data for DMFC uthevet

	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Anode	Ni	porøs C	porøs C	porøs C og edelmetaller	porøs Ni-Cr/Ni-Al	Ni-YSZ-cermet
Elektrolytt	KOH	ionebyttemembran	ionebyttemembran	fosforsyre (H ₃ PO ₄)	karbonatsmelte	YSZ
Ladningsbærer (mobilt ion)	OH ⁻	H ⁺	H⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Katode	Ni/C	porøs C	porøs C	porøs C og edelmetaller	Li-dopet NiO	Sr-dopet LaMnO ₃
Katalysator	Pt/Ni	Pt/Ru	Pt+Ru(anode) Pt(katode)	Pt og Ru		Ni
Brensel	H ₂	ren H ₂	metanol (CH₃OH)	H ₂	H ₂ eller CO	rent H ₂ eller fossilt brensel som CH ₄ /CO
Oksidant	rent O ₂	O ₂	O₂	O ₂	O ₂ + CO ₂	O ₂
Driftstemperatur	50-250 °C	50-120 °C	50-120 °C	150-200 °C	600-800 °C	600-1100 °C
Virkningsgrad	70 %	40-50 %	40-50 %	40 %	60 %	45-70 %
Typisk effekt	1-100 kW	1 W-250 kW	<3 kW	10 kW-11 MW	500 kW-10 MW	1 kW-10 MW
Bruksområde	romfartøy, u-båt, bil, små elektromotorer	buss, bil, pc, mobiltelefoner, småelektriske apparater, små CHP	buss, bil, pc, mobiltelefoner, småelektriske apparater, små CHP	små energiverk, middels CHP	energiverk, store CHP	energiverk, CHP
Ionene i elektrolytten går	fra katoden til anoden	fra anoden til katoden	fra anoden til katoden	fra anoden til katoden	fra katoden til anoden	fra katoden til anoden
Vann som produkt ved	Anoden	katoden	katoden	katoden	anoden (ikke vann med CO som brensel)	anoden (ikke vann med CO som brensel)

Kilder : [4, 11-13] (med forbehold om feil/ufullstendighet).

I tabell 3 er data som gjelder metanolbrenselceller uthevet. Metanolbrenselceller er en variant av PEM-brenselcellen, se figur 16. PEMFC trenger rent H₂ som drivstoff, mens for denne typen er metanol drivstoffet. Kjemisk formel for metanol er CH₃OH.



Figur 16 Skjematisk tegning av DMFC

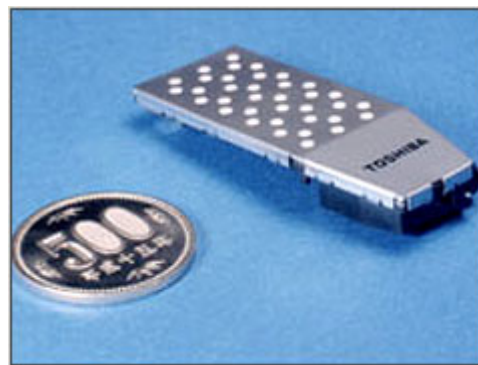
Metanolbrensel har en katalysator som er en blanding av platina, Pt, og ruthenium, Ru, (gjærne i forholdet 50:50 [4]) og ikke bare Pt som er vanlig for PEMFC. Hvorfor det bare er nødvendig med den spesielle katalysatoren bare på anoden, og ikke på katoden, kan vi se av reaksjonsligningene i figur 16. I katodereaksjonen er det de samme elementene som reagerer som i en vanlig PEMFC, som vi kan se i figur 9, og da er det

ikke nødvendig med en komplisert produsert og kostbar katalysator.

Metanolbrenselcellen har den engelske betegnelsen *direct methanol fuel cell* (DMFC). "Direkte-metanol" fordi brenselcellen bruker metanol direkte som brensel. Metanolen må blandes med vann før den brukes som drivstoff for å muliggjøre anodereaksjonen. For å opprettholde metanolens energitetthet, lagres vann og metanol hver for seg.

Det er forholdsvis enkelt å få hydrogen fra metanol og bruke hydrogen som brensel. Hvis vi gjør det bruker vi faktisk betegnelsen indirekte-metanol brenselcelle. Metanolen reformeres til hydrogen i en atskilt enhet.

Konkurrenten til metanolbrenselcellen er oppladbart batteri, spesielt for bruk i mobiltelefoner, laptop-pc-er etc. Slikt småelektrisk utstyr er et egnet bruksområde for metanolbrenselceller fordi disse typene brenselceller (se bilde av en metanolbrenselcelle i figur 17 og 18) leverer liten effekt, men har høy energitetthet (liten effekt, noen få watt, over lang tid). Forklaringen som du kanskje liker bedre er: mobiltelefonen din bruker egentlig ikke så mye strøm, og du ønsker at mobilen er på hele tiden, men du ønsker ikke å måtte bytte strømkilde ofte – en DMFC kan oppfylle dette kravet!



Figur 17 Toshiba metanolbrenselcelle med energi utbytte på 100 mW [16]

Men, det er stor sannsynlighet for at din mobiltelefon har batteri og ikke metanolbrenselcelle. Hvorfor er det slik? Det henger sammen med de mange utfordringene i brenselcelleteknologien. DMFC er også den brenselcellen det sist ble knyttet forskningsaktivitet til. Den teknologiske utviklingen ligger derfor noe etter de andre typene.

En av utfordringene er at effekttettheten for en DMFC er lavere sammenlignet med en "hydrogen-PEMFC" på grunn av:

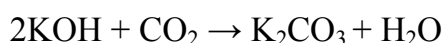
- Metanol blandes lett med vann og fører til en lekkasje av metanol gjennom elektrolytten fra anoden til katoden (se figur 16). Denne effekten, brensellekasje/brenselovergang (fuel crossover), resulterer i en reduksjon av den totale celledspenningen. Små mengder av bortkastet brensel vandrer gjennom elektrolytten som ikke bidrar til at elektroner sendes ut i den ytre kretsen som gir oss strøm (kjemisk kortslutning).
- Anodereaksjonen går mye saktere med metanol enn med hydrogen, oksidasjon av metanol er egentlig en veldig komplisert reaksjon.

For å redusere brensellekkasjen i DMFC er det vanlig å 1) gjøre katalysatoren på anoden så aktiv som mulig, 2) kontrollere drivstofftilførselen, 3) ha tykkere elektrolytt enn for en vanlig PEMFC og 4) endre noe på PEM-sammensetningen. Forskningsmiljøer ser på om det går å bruke katalysator på katoden forskjellig fra platina, bruke et sjikt i elektrolytten som er porøs for protoner og mindre porøs til metanol og utvikle mer ledende ionebyttemembraner.

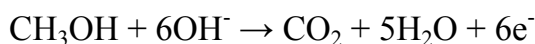
I den kompliserte reaksjonen som oksidasjon av metanol er, er det mulig at karbonmonoksid, CO, dannes, derfor er valg av katalysator viktig fordi CO forgifter Pt. Det er også mulig å bruke annet brensel enn metanol, for eksempel formaldehyd eller mursyre [4].

En fordel med metanol, og ikke hydrogen, som drivstoff er at eksisterende infrastruktur på distribusjonssiden (som brukes til bensin, gass etc.) sannsynligvis kan benyttes til metanolen [17]. Når det gjelder sikkerhetsspørsmål vedrørende metanol er nivået omtrent som for hydrogen.

I metanolbrenselcellen brukes det polymerelektrolyttmembran. I prinsippet kunne vi tenke oss å bruke alkalisk metanolbrenselcelle, men det er ikke hensiktsmessig. Reaksjonen mellom CO₂ og den alkaliske elektrolytten er et problem:



Som for den alkaliske brenselcellen dannes det karbonater når hydroksyl reagerer med karbondioksid. Reaksjonsligningen for anoden er



Elektrolytten mister raskt sin alkalinitet. Hvis dette var mulig ville dette gjøre det til en attraktiv brenselcelle fordi seks elektroner dannes for hvert metanolmolekyl. Men, som vi ser av reaksjonsligningen til "metanol-PEMFC" (det vil si en DMFC) i figur 16, dannes det også der seks elektroner for hvert metanolmolekyl.



Figur 18 Metanolbrenselcelle for bærbar pc, (a) og (b): Toshiba [18], (c): UltraCell Corporation [19]

Forkortelser som brukes

Brenselceller

Her er det brukt den vanlige engelske forkortelsen og norsk oversettelse av den engelske forkortelsen

AFC	alkaline fuel cell	alkalisk brenselcelle
DMFC	direct methanol fuel cell	direkte-metanol- eller metanolbrenselcelle
MCFC	molten carbonate fuel cell	karbonatsmeltebrenselcelle
PAFC	phosphoric acid fuel cell	fosforsyrebrenselcelle (sur brenselcelle)
PEMFC	proton exchange membrane fuel cell	protonbyttmembranbrenselcelle (protonledende)
	polymer electrolyte membrane fuel cell	polymerelektrolyttmembranbrenselcelle
		også kalt polymerbrenselcelle
SOFC	solid oxide fuel cel	fastoksidbrenselcelle
URFC	unitized regenerative fuel cell	regenerativ/reverserbar brenselcelle

Kjemiske symbol/forbindelser

Al	grunnstoffet aluminium	LaMnO ₂	lantant-mangan-oksidi
C	grunnstoffet karbon	Li	grunnstoffet litium
CH ₃ OH	Metanol	N	grunnstoffet nitrogen
CH ₄	Metan	Na	grunnstoffet natrium
CO	karbonmonoksid	Na ₂ CO ₃	natriumkarbonat (et salt)
CO ₂	karbondioksid	NaBH ₄	natriumborhydrid
Cr	grunnstoffet krom	NaOH	natriumhydroksid
F	grunnstoffet fluor	Ni	grunnstoffet nikkeli
H ⁺	Proton	NiO	nikkeloksid
H ₂	Hydrogen	O ₂	oksygen
H ₂ NNH ₂	Hydrazin	O ²⁻	oksygenion
H ₂ O	Vann	OH ⁻	hydroksid
H ₃ PO ₄	Fosforsyre	Pt	grunnstoffet platina
HN ₃	ammoniakk	Ru	grunnstoffet ruthenium
HSO ₃	svovelsyring	SO ₃ ⁻	sulfitt
K ₂ CO ₃	kaliumkarbonat (et salt)	Sr	grunnstoffet strontium
KOH	kaliumhydroksid (kali- lut)	Y	grunnstoffet yttrium

Andre forkortelser

°C	grader Celsius
CHP	forkortelse for engelske <i>combined heat and power</i> = kombinert varme og energi/strøm
e ⁻	elektron
E ⁰	standard cellespenning. Potensialet for en celle der konsentrasjonen av de ionene som deltar i reaksjonen er 1 M og trykket av de gassene som deltar er 1 atm. (dvs. i standardtilstand)
V	volt
YSZ	yttriumstabilisert zirkonia
®	registrert varemerke: retten til merke for identifikasjon av varer og tjenester, slagord, vareutstyr mv. [20]

Forklaringer, definisjoner og huskeregler

- Anode: ved anoden skjer det en oksidasjon (huskeregel: a og o er vokaler).
- Asbest: samlenavn for fintrådede mineraler av hornblende- og serpentergruppen [20]. Forbudt å bruke i Norge pga. at innånding av asbeststøv er helsefarlig og kreftfremkallende.
- Cermet: kermet (keram + metall).
- Distribusjonssiden: distribuere: fordele, sende ut.
- Dopet: å dope: tilsette små mengder fremmedelement for å endre materialets egenskaper.
- Drivhusgasser: CO₂, klorfluorkarboner (KFK), metan (CH₄), N₂O, ozon (O₃).
- Elektroder: anode og katode. Ved anoden skjer det en oksidasjon og ved katoden skjer det en reduksjon (huskeregel: a og o er vokaler og k og r er konsonanter).
- Elektrokjemi: del av kjemien som omhandler overganger mellom kjemisk og elektrisk energi.
- Elektrolytt: løsning som inneholder mange ioner og leder elektrisk strøm godt, leder ikke elektroner. Elektrolytten har tre funksjoner i en brenselcelle: lede ioner, være elektrisk isolator og danne barriere mellom anode og katode.
- Fornybare energikilder: vannkraft, sol, vind, biomasse, bølger etc.
- Hydrazin (H₂NNH₂): spaltes til hydrogen og nitrogen og derfra reagerer hydrogenet som vanlig [4]. Det positive med hydrazin er at det er rimelig, lett å fylle på og enkelt. Om det er så enkelt når vi vet at hydrazin er giftig, kreftfremkallende og eksplosivt, ja, det er en annen sak.
- Infrastruktur: det nett av faste anlegg som er grunnlaget for virksomhet.
- Ion: elektrisk ladd atom eller atomgruppe: atomet har fanget eller avgitt ett eller flere elektroner.
- Katalysator: et stoff som øker reaksjonshastigheten uten selv å bli brukt opp/delta i reaksjonen.
- Katode: ved katoden skjer det en reduksjon (huskeregel: k og r er konsonanter).
- Kortslutning: fås i elektrisk krets når det oppstår en forbindelse (uønsket) med liten motstand, strømmen kan ta en kortere vei enn det som er meningen.
- Legering: metallblanding.
- Matriks: element som holder struktur på plass.
- Metanol (CH₃OH): metylalkohol. Virker berusende, men er langt mer giftig enn etylalkohol (vanlig alkohol) og kan føre til blindhet og død [20].

- Natriumborhydrid (NaBH_4): er egentlig en hydrogenbærer og meget dyrt, men kan også brukes som drivstoff, f.eks. i oppløst drivstoff AFC. Om stoffet selv er dyrt, så trengs det rimelige elektroder med lite platina på anoden [4].
- Natronkalk: granulert blanding av NaOH og kalsiumhydroksid (CaO), brukes til absorpsjon av CO_2 [20].
- Oksidasjon: avgir elektroner.
- Polymer: oppstår når små molekyler (monomerer) bygges sammen til lange kjeder.
- Porøs: full av fine små hulrom.
- Reduksjon: tar opp elektroner.

||| + : Huskeregel for dette grafiske symbolet: den korte vertikale streken representerer et minustegn hvis vi tegner streken vertikalt i stedet for horisontalt. Den lange vertikale streken kan vi tenke representerer et plusstegn hvis vi legger strekene etter hverandre vertikalt i stedet for i kryss.

Referanser

- [1] A. Holmesland, H. Evang, and G. Wicklund-Hansen, *Aschehous konversasjonsleksikon bind 3*. Oslo: Aschehoug, 1974.
- [2] "Fuel Cell Today. Reference Centre. Glossary, www.fuelcelltoday.com (accessed 22.11.04)."
- [3] "<http://www.brenselcelle.no> (accessed 15.11.04)."
- [4] J. Larminie and A. Dicks, *Fuel cell systems explained*. Chichester: Wiley, 2003.
- [5] "http://www.caplex.net/web/magasinet/artikkel.asp?art_id=hydrogen (accessed 23.11.04)."
- [6] "Brochure: NEBUS. Paving the way for tomorrow's traffic," Daimler-Benz AG, Corporate Communication.
- [7] "<http://www.energifakta.no/documents/Oekonomi/Kraftmarked/Norden.htm> (accessed 15.11.04)."
- [8] "http://www.husogheim.no/6/6_3.html (accessed 15.11.04)."
- [9] "<http://www.kystverket.no/default.aspx?did=9046240> (accessed 15.11.04)."
- [10] "<http://www.energifakta.no/documents/Energi/Lagring/Hydrogenlagring.htm> (accessed 15.11.04)."
- [11] "http://www.fuelcell.no/fuel_cell_types_mainpage_no.htm (accessed 15.11.04)."
- [12] I. Dincer, "Technical, environmental and exergetic aspects of hydrogen energy systems," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 27, pp. 265-285,

- 2002.
- [13] NOU, "Norges offentlige utredninger. NOU 2002: 7. Gassteknologi, miljø og verdiskaping." Oslo: Statens forvaltningstjeneste. Informasjonsforvaltning, 2002.
 - [14] "http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html (accessed 23.11.04)."
 - [15] M. Cifrain and K. V. Kordesch, "Advances, aging mechanism and lifetime in AFCs with circulating electrolytes," *Journal of Power Sources*, vol. 127, pp. 234-242, 2004.
 - [16] "<http://www.dpreview.com/news/0406/04062401toshibafuel.asp> (accessed 08.11.05)."
 - [17] NOU, "Norges offentlige utredninger. NOU 1998: 11. Energi- og kraftbalansen mot 2020." Oslo: Statens forvaltningstjeneste. Statens trykning, 1998.
 - [18] "http://www.toshiba.co.jp/about/press/2003_03/pr0501.htm (accessed 08.11.05)."
 - [19] "<http://www.primidi.com/2005/08/27.html> (accessed 08.11.05)."
 - [20] "Caplex.no (accessed 25.11.04)."

